

УДК 616.2-001.37:613.842-022.532

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСАЖДЕНИЯ НАНО- И СУБМИКРОННЫХ ЧАСТИЦ ТАБАЧНОГО ДЫМА НА ДЫХАТЕЛЬНЫЕ ПУТИ

Тимошенко В.И., Чернов Н.Н., Лупандина М.А., Пятакова О.Л.

*Южный федеральный университет, г. Таганрог*

### РЕЗЮМЕ

Рассматриваются особенности осаждения высокодисперсных наноразмерных частиц дымов на биологические поверхности дыхательных путей на примере табачного дыма. Построена модель осаждения частиц никотиновых смол по пути следования дымов через дыхательные пути. Получено решение уравнения для изменения осаждаемого диффузионного потока нано- и субмикронных частиц через гидродинамический пограничный слой. Экспериментально исследовано осаждение частиц никотиновых смол на дыхательные пути методом сканирования распределения осевших наночастиц с помощью атомно-силового микроскопа SobverPRO. Получены картины дисперсного распределения наночастиц дыма 4 видов табака на различных участках дыхательных путей, что позволило говорить об отсутствии эффекта коагуляции частиц в дыхательных путях. Установлено, что у ребенка как пассивного курильщика осаждение диффузионного потока частиц никотина пропорционально выше, чем у взрослого человека, так как ширина канала дыхательных путей меньше, чем у взрослых людей.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** осаждение частицы, табачный дым, пограничный слой, диффузионный поток.

### Введение

Осаждение различных дымов и туманов является актуальной социальной и научно-технической проблемой, в особенности для аэрозолей с микронными и субмикронными частицами. Мельчайшие микронные и субмикронные частицы (оксиды железа при конвертерном производстве, различные нанопорошки и т.д.) разлетаются на сотни километров со всеми вытекающими последствиями для здоровья, поэтому проблему осаждения и улавливания частиц справедливо называют социальной. Известно, что курение наносит вред здоровью не только самих курящих, но и окружающих их людей, «пассивных курильщиков». Оценку такого вреда можно получить только проанализировав степень осаждения частиц различного размера при прохождении ими дыхательных путей.

Нами была поставлена задача исследовать процесс осаждения на поверхности нано- и субмикронных частиц на примере частиц табачного дыма различного типа сигарет, что позволит оценить их влияние на дыхательные пути организма.

До настоящего времени исследования осаждения частиц проводились с аэрозолями, медианный размер которых превышал 1–5 мкм [1]. В связи с необходимостью оценки вреда организму, наносимого курильщиками самим себе и окружающим их «пассивным курильщикам», а также с интенсификацией технологических процессов и использованием нанотехнологий, загрязняющих воздух нано- и субмикронными частицами, возникла потребность в проведении исследований с более мелкими наноразмерными аэрозольными частицами.

В связи с обозначившимся интересом к нанотехнологиям мы провели вначале экспериментальные (2006–2011 гг.), а затем теоретические (2010–2012 гг.) исследования осаждения наноразмерных аэрозолей через гидродинамический пограничный слой [1]. Эта тематика ориентирована на выяснение параметров технологических установок для нанесения наночастиц при создании новых материалов, реализации защитных покрытий, протекции обрастания в загрязненной среде лопаток турбин и поверхностей скоростных аппаратов, оценки вреда курения и др.

На основе опыта осаждения промышленных аэрозолей [1, 2] известно, что при проектировании техноло-

✉ Чернов Николай Николаевич, тел.: 8 (8634) 37-17-95;  
e-mail: nik-chernov@yandex.ru

гических аппаратов, реализующих осаждение микронных аэрозолей в потоке, надо знать зависимость потока  $\Pi$  высокоадгезионного аэрозоля через гидродинамический пограничный слой  $\delta_r$  от основных параметров среды (плотности  $\rho$ , кинематической вязкости  $\nu = \rho/\eta$ , температуры  $T$ ) и аэрозолей (дисперсного состава, адгезионной способности и т.д.).

Наноразмерные частицы (особенно никотина табачного дыма) обладают высокой адгезионной способностью, и поэтому, проходя пограничные слои, они осаждаются на поверхности. Отсюда была сформулирована задача математического моделирования (на базе первого уравнения Фика) [3] диффузионных потоков  $\Pi_x$ ,  $\Pi_y$  наночастиц через пограничные слои (рис. 1) применительно к дыхательным путям. Осаждение аэрозолей происходит на поверхности через гидродинамический пограничный слой

$$d_r = \sqrt{\frac{l^2}{Re}} = \sqrt{\frac{n l}{V_0}}, \quad (1)$$

где  $V_0$  – начальная скорость потока,  $l$  – характерный размер течения,  $Re$  – число Рейнольдса.

Решается уравнение непрерывности для стационарного ( $\frac{\partial \Pi}{\partial t} = 0$ ) потока в виде

$$\frac{\partial \Pi_x}{\partial x} + \frac{\partial \Pi_y}{\partial y} = 0, \quad (2)$$

где диффузионный поток  $\Pi_y(x)$  через соответствующий пограничный слой (рис. 1) на стенку равен

$$\Pi_y(x) = -D \frac{\partial N(x, y)}{\partial y}. \quad (3)$$

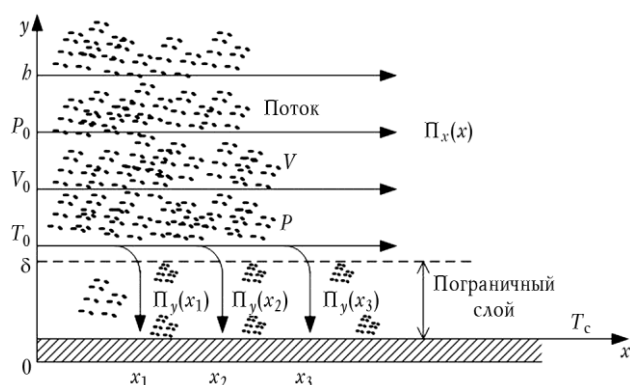


Рис. 1. Ответвление диффузионного потока через пограничный слой

Как видно из выражения (3), основной причиной увеличения осаждаемого диффузионного потока наночастиц  $\Pi_y$  является рост градиента счетной концентрации  $\frac{\partial N(x, y)}{\partial y}$ , а также коэффициента диффузии  $D$  для

наночастиц (по сравнению с микронными аэрозолями) [1].

В работе [4] учтено изменение давления  $p$ , температуры  $T$ , скорости потока  $V$  от изменения толщины пограничного слоя. В итоге получено дифференциальное уравнение для потока  $\Pi_y(x)$  в виде

$$\frac{d\Pi_y(x)}{dx} + \Pi_y(x) \frac{DT_c}{V_0 h T_c}, \quad (4)$$

где  $T_c$  – температура стенки.

Решение уравнения (4) дало выражения для оценки относительного изменения осаждаемых потоков нано- и субмикронных аэрозолей через пограничный слой  $\delta_r$  в гидродинамическом потоке

$$\frac{\Pi_y(x)}{\Pi_0} = \frac{kT(p)^{1/2}(1+a)b}{(V_0)^{1/2}(h l)^{1/2}6\pi h R} \cdot \exp \left\{ -\frac{kT(p)^{1/2}(1+a)b}{(V_0)^{1/2}(h l)^{1/2}6\pi h R} \frac{x}{h} \right\}, \quad (5)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана.

Математическая модель, заложенная в формуле (5), позволяет рассчитать осаждаемый диффузионный поток наноразмерных частиц при варьировании параметров аэрозоля (радиуса частиц  $R$ , коэффициента диффузии  $D$ , скорости потока  $V$ ), среды (вязкости  $\eta$  и  $\nu$ , плотности  $\rho$ , температуры  $T$  и размеров канала по движению частиц дыма  $h$ ).

Приведенная математическая модель, описывающая распределение частиц табачного дыма в дыхательных путях у курильщиков (активных и пассивных), позволяет сделать вывод, что у ребенка как у пассивного курильщика осаждение диффузионного потока никотина пропорционально выше, чем у взрослого человека, так как ширина канала  $h$  в выражении (4) находится в знаменателе.

В качестве объекта экспериментальных исследований были выбраны наночастицы аэрозоля табачного дыма четырех сортов сигарет: «Marlboro», «Bond», «Наша марка» и «Махорка». Привлекла простота и дешевизна генератора аэрозоля, а также повторяемость и относительная безопасность процесса. Экспериментальная установка [3] содержала типичные для осаждения частиц в потоке части: осадительную камеру с протяжкой потока, генератор дыма, приборы контроля параметров потока аэрозоля. Осаждение аэрозольных частиц происходило на ситаловые подложки, с которых затем производилось сканирование распределения осевших наночастиц никотиновой смолы с помощью атомно-силового микроскопа SobverPRO в научно-образовательном центре «Нанотехнологии» Южного федерального университета.

Для иллюстрации на рис. 2 представлены трехмерные микрофотографии частиц и их агрегатов табачного дыма сигарет сортов «Marlboro» и «Bond». Эксперименты проводились в условиях, аналогичных нормальным условиям движения воздушной массы в дыхательных путях.

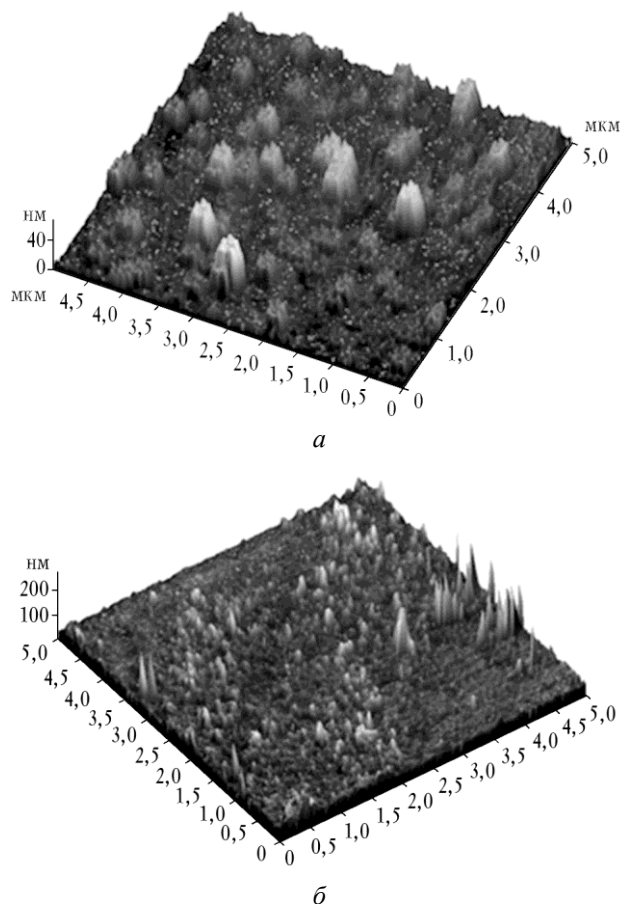


Рис. 2. Микрофотографии наноразмерных частиц и их агрегатов сигаретного дыма: *а* – «Marlboro», *б* – «Bond»

На микрофотографиях видно, что частицы и их агрегаты имеют традиционную для никотиновой смолы округлую форму. Встречаются сплюснутые агрегаты. Подобных нанофотографий с разным масштабированием для четырех типов дымов сигарет получены многие сотни при различных сочетаниях параметров потока табачного дыма, времени прохождения и других.

Ранее [1, 2] для многих промышленных аэрозолей мы наблюдали микронные частицы с помощью оптического и электронного микроскопов. Нанофотографии типа рис. 2 дают несравненно более четкие и наглядные представления о формах и размерах частиц по сравнению с электронной микроскопией, не говоря уже об оптической. Имея на кафедре полувековой опыт исследований коагуляции и осаждения дымов,

мы смогли впервые увидеть и получить обширную информацию о наноразмерных аэрозольных частицах с помощью атомно-силовой микроскопии.

Для всех сканов, подобных рис. 2, для каждой из ситаловых подложек были подсчитаны частицы разных размеров. Эти результаты обработаны и построены в виде графиков дисперсного распределения в вероятностно-логарифмическом масштабе по координатам (методика изложена в работах [2, 4]). Серия графиков дисперсного распределения по счету аэрозолей табачного дыма для перечисленных сортов сигарет при осаждении частиц приведена на рис. 3. Экспериментальные точки отмечены крестиками.

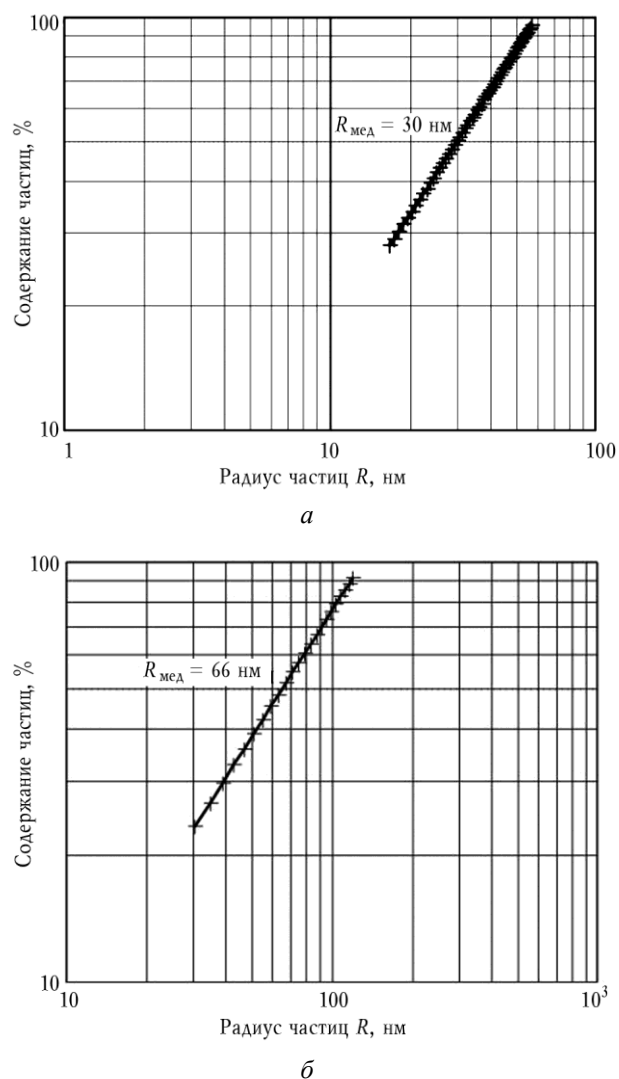


Рис. 3. Дисперсное распределение по счету частиц сигаретного дыма: *а* – «Marlboro», *б* – «Bond»

Как видно из рис. 3, графики дискретного распределения в указанных координатах достаточно хорошо укладываются на прямую линию, что свидетельствует о нормально-логарифмическом законе распределения

частиц по размерам. Причем медиальный радиус  $R_{\text{мед}}$  сигаретного дыма «Marlboro» составляет 30 нм, для «Bond» – 66 нм.

Для наноразмерных аэрозолей табачного дыма весовую концентрацию не удастся измерить. Ее можно найти только путем пересчета из кривой дисперсного распределения и величины потока  $\Pi(x)$ .

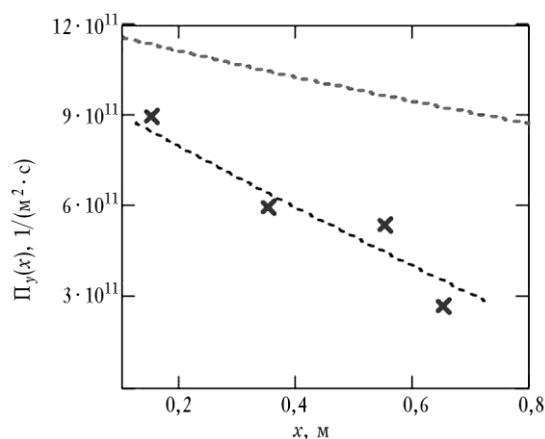


Рис. 4. Изменение осажденного диффузионного потока через гидродинамический пограничный слой (крестики – эксперимент, пунктирная линия – теория)

В опубликованных работах (см., например, [4]) показаны результаты расчетов и экспериментов с четырьмя типами аэрозолей. Оценена степень осаждения никотиновых частиц из потока по пути его следования

в дыхательных путях человека. Осаждение из потока наночастиц при некоторых сочетаниях параметров в 5–8 раз превышает соответствующие значения для субмикронных частиц. На рис. 4 приведено изменение осажденного диффузионного потока через пограничный слой частиц дыма сигарет «Marlboro» от расстояния  $x$ .

Удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчетных результатов для четырех типов осажденных тонкодисперсных аэрозолей позволяет сделать вывод о правильной математической модели диффузионного потока нано- и субмикронных частиц через гидродинамический пограничный слой.

#### Литература

1. Тимошенко В.И., Чернов Н.Н. Осаждение и осадконакопление промышленных дымов. Ростов н/Д: Ростиздат. 224 с.
2. Тимошенко В.И., Чернов Н.Н. Взаимодействие и диффузия частиц в звуковом поле. Ростов н/Д: Ростиздат, 2003. 304 с.
3. Timoshenko V., Belenkiy V., Fedoruk T. Kinetics of sonic coagulation and precipitation of high disperse aerosols // Ultrasonics. 1976. V. 14, № 5. P. 218–222.
4. Лупандина М.А. Осаждение нано- и субмикронных частиц при интенсификации технологических процессов в мощном акустическом поле: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Таганрог, 2012. 23 с.

Поступила в редакцию 21.02.2014 г.

Утверждена к печати 07.05.2014 г.

**Тимошенко Владимир Иванович** – д-р техн. наук, профессор кафедры электрогидроакустической и медицинской техники Института нанотехнологии, электроники и приборостроения Южного федерального университета (г. Таганрог).

**Чернов Николай Николаевич** (✉) – д-р техн. наук, профессор кафедры электрогидроакустической и медицинской техники Института нанотехнологии, электроники и приборостроения Южного федерального университета (г. Таганрог).

**Лупандина Мария Алексеевна** – канд. техн. наук, ассистент кафедры электрогидроакустической и медицинской техники Института нанотехнологии, электроники и приборостроения Южного федерального университета (г. Таганрог).

**Пятакова Ольга Львовна** – аспирантка кафедры электрогидроакустической и медицинской техники Института нанотехнологии, электроники и приборостроения Южного федерального университета (г. Таганрог).

✉ **Чернов Николай Николаевич**, тел. 8 (8634) 37-17-95; e-mail: nik-chernov@yandex.ru

## RESEARCH THE DEPOSITION NANO- AND SUBMICRON PARTICLES OF TOBACCO SMOKE ON AIRWAY

Timoshenko V.I., Chernov N.N., Lupandina M.A., Pyatakova O.L.

*Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation*

### ABSTRACT

The features of deposition of highly dispersed particles of smoke on nanoscale biological airway surface on the example of tobacco smoke are considering. A model of particle deposition of the nicotine gum along the way through the smoke inhaled. Obtain a solution of the equation for the diffusion flux changes deposited nano- and submicron particles through hydrodynamic boundary layer.

The particle deposition of nicotine gum on the airways by scanning the distribution of nanoparticles deposited using an atomic force microscope SobverPRO was experimentally studied. Patterns of distribution of nanoparticles dispersed smoke 4 species of tobacco in different parts of the respiratory tract were obtained. That allowed to talk about the absence of the effect of coagulation of the airway. It was established that the child as a passive smoker particle deposition diffusive flux of nicotine is proportionally higher than adult because the channel width is less than the airways than in adults.

**KEY WORDS:** deposition of particles, tobacco smoke, boundary layer, diffusion flux.

*Bulletin of Siberian Medicine, 2014, vol. 13, no. 4, pp. 108–112*

### References

1. Tymoshenko V., Chernov N. *Deposition and sedimentation of industrial fumes*. Rostov-on-Don, Rostizdat Publ. 224 p. (in Russian).
2. Tymoshenko V., Chernov N. *The interaction and diffusion of particles in a sound field*. Rostov-on-Don, Rostizdat Publ., 2003. 304 p. (in Russian).
3. Timoshenko V., Belenkij V., Fedoruk T. Kinetics of sonic coagulation and precipitation of high disperse aerosols. *Ultrasonics*, 1976, vol. 14, no. 5, pp. 218–222.
4. Lupandina M.A. *Deposition of nano-and submicron particles in the intensification of technological processes in powerful acoustic field*. Autor. dis. cand. tech. sci. Taganrog, 2012. 23 p. (in Russian).

**Timoshenko Vladimir I.**, Institute of nanotechnology, electronics and electronic equipment engineering, Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation.

**Chernov Nikolay N.** (✉), Institute of nanotechnology, electronics and electronic equipment engineering, Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation.

**Lupandina Maria A.**, Institute of nanotechnology, electronics and electronic equipment engineering, Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation.

**Pyatakova Olga L.**, Institute of nanotechnology, electronics and electronic equipment engineering, Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation.

✉ **Chernov Nikolay N.**, Ph. +7 (8634) 37-17-95; e-mail: nik-chernov@yandex.ru